

Estabilização de um solo colúvio aluvionar com cimento e lodo de esgoto calcinado para aplicação em camadas de pavimento

Bianca Bussolo Pizoni (1), Christiane Ribeiro Müller (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense

(1) biancapizoni@hotmail.com, (2) christiane@unescc.net

Resumo: Atualmente pesquisas vêm sendo desenvolvidas para minimizar os resíduos provenientes das ações humanas, como por exemplo, o lodo gerado nos processos de tratamento de esgotos sanitários domésticos, conhecido como lodo de esgoto. Este se trata de um resíduo semissólido, pastoso e predominantemente orgânico geralmente inserido como resíduo de “classe I”. Sua classificação é consequência das características de patogenicidade decorrentes da presença de microrganismos infecciosos evidenciados em análises químicas. A partir disso, o objetivo principal deste trabalho é a estabilização de um solo colúvio aluvionar com adição de cimento e cinza de lodo de esgoto para aplicação nas camadas do pavimento. O solo utilizado foi classificado como A-5 e a opção da inserção de cimento nas misturas foi de 5%, valor mínimo e 8%, a fim de buscar contribuição no aumento de resistência para a aplicação proposta. O lodo foi calcinado a uma temperatura de 800 °C. Foram elaboradas seis misturas mais o solo puro para obtenção do comparativo entre elas. Para atender o objetivo principal, o programa experimental contemplou ensaios de Granulometria, Índices de Consistência, Índice de Suporte Califórnia, Expansão e Resistência à Compressão Simples. Foram realizadas exposição e cura dos corpos de prova no tempo zero (sem cura) e após 14 dias. Com base nos resultados de granulometria dos finos, todas as misturas, sem nenhuma exceção, foram consideradas como silto argilosas, já que a matriz predominante foi composta por silte. A mistura com 92% de solo e 8% de cimento apontou umidade ótima de 19,98%, sendo considerada a mistura com menos percentual de argila. Essa mesma mistura apresentou valor elevado para o ensaio do Índice de Suporte Califórnia sem cura, alcançando 125,80% e baixo valor de expansão de 0,45%, se adequando como camada de base para a pavimentação. A mistura com adição de 8% de cimento e 5% de lodo obteve resistência à compressão sem cura de 0,92 MPa, sendo utilizável como camada de subleito e em obras de terraplanagem. Em posse do descrito acima, este trabalho atendeu o objetivo principal proposto em função dos resultados obtidos.

Palavras-chave: esgoto sanitário doméstico; resíduos; estabilização; pavimentação.

Stabilization of a Coluvium Alluvial soil with cement and calcined sewage sludge for application in pavement layers

Abstract: Currently, researches have been developed to minimize the waste from human actions, such as the sludge generated in the domestic sewage treatment processes, known as

sewage sludge, for example. This is a semi-solid, pasty and predominantly organic residue generally inserted as a “class I” residue. Its classification is a consequence of the pathogenicity characteristics resulting from the presence of infectious microorganisms evidenced in chemical analysis. From this, the main objective of this work is the stabilization of an alluvial colluvial soil with the addition of cement and sewage sludge ash for application in the pavement layers. The used soil was classified as A-5 and the options of cement insertion in the mixtures was of 5%, minimum value, and of 8%, in order to seek contribution in the increase of resistance for the proposed application. The sludge was calcined at the temperature of 800°C. Six mixtures were elaborated, plus pure soil, in order to obtain a comparison between them. To comply with the main objective, the experimental program included Granulometry, Consistency Indexes, California Support Index, Expansion and Simple Compression Resistance trials. Exposure and cure of the specimens were performed at time zero (without cure) and after 14 days. Based on the thin particles granulometry results, all mixtures, without any exception, were considered as clay silt, since the predominant matrix was composed of silt. The mixture with 92% soil and 8% cement showed optimum humidity of 19,98%, being considered the mixture with less clay percentage. This same mixture presented elevated value for the California Support Index test, reaching 125,80% (without cure) and low expansion value of 0,45%, making it suitable as a base layer for paving. The mixture with 8% cement addition and 5% sludge achieved a compressive resistance of 0.92 MPa (without cure), being usable as subgrade layer and in earthmoving jobs. In possession of the described above, this work met the proposed main objective based on of the obtained results.

Keywords: domestic sanitary sewage; waste; stabilization; paving.

Introdução

A responsabilidade ambiental sustentável gera uma grande preocupação com o ecossistema que estamos inseridos, acarretando em exigências cada vez maiores em relação à saúde populacional e ao meio ambiente. Desse modo, pesquisas visam a necessidade de minimizar os resíduos provenientes das ações humanas, como por exemplo, o gerado nos processos de tratamento de esgotos sanitários domésticos brasileiros (GEYER, 2001).

A maioria das cidades brasileiras possuem suas estações de tratamento de esgoto (ETEs), onde o esgoto sanitário recebe adequado tratamento com diferentes sistemas tecnológicos. Nestes sistemas de tratamento, ao final do processo, a água presente nos resíduos sólidos e orgânicos, retorna à fonte com alto grau de pureza. No entanto, ocorre a geração de um resíduo semissólido, pastoso e predominantemente orgânico, chamado de lodo de esgoto (KELM, 2014).

Esse material é nocivo ao ser humano e ao meio ambiente, com elevado grau de toxicidade e presença de metais pesados, possibilitando a transmissão de agentes patógenos (PEDROZA *et al.*, 2010). De acordo com a norma ABNT NBR 10.004:2004, o lodo de esgoto geralmente está inserido como resíduo de “classe I” – perigoso. Sua classificação é consequência das características de patogenicidade decorrentes da presença de microrganismos infecciosos evidenciadas na maioria dos estudos de análises químicas. De qualquer forma, como existe alteração na composição química dos lodos gerados, é necessário uma verificação química e quantitativa do material para comparação com os valores dados pela norma citada acima (PEREIRA, 2012).

No Brasil, a produção do lodo cresce de acordo com o crescimento populacional e em 2010 as estimativas apresentavam uma produção de 150 a 220 mil toneladas por ano de matéria seca proveniente do tratamento de esgoto (PEDROZA *et al.*, 2010). Sendo assim, é de suma importância o tratamento adequado desse esgoto, o descarte final do resíduo gerado e/ou a reciclagem do mesmo (GEYER, 2001).

A lei brasileira nº 9.605 de 12/02/1998 de crimes ambientais, declara que é responsabilidade dos órgãos produtores de resíduos o descarte final do material gerado. Neste aspecto, os aterros sanitários são a opção mais usual para o descarte do lodo gerado ao final do processo de tratamento. No entanto, alguns destes aterros estão com sua capacidade esgotada e a grande produção desse material dispõe de alto custo para os órgãos responsáveis pelo descarte (KELM, 2014).

Várias pesquisas vêm sendo feitas visando a utilização de resíduos na construção civil e o uso do lodo de esgoto tratado é uma delas, como sua aplicação na produção de argamassas, fabricação de cimento, em camadas de aterro sanitário e também na pavimentação. Pereira (2012), ao adicionar a cinza do lodo e cimento em um solo siltoso de cor avermelhada, comprovou seu aumento de resistência. Kelm (2014), ao avaliar o comportamento do lodo de esgoto tratado como estabilizante, concluiu, a partir de ensaios laboratoriais, a viabilidade de utilização da mistura de cinza do lodo com o cimento ou cal em camadas do pavimento.

O manual de pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), define pavimento como uma superestrutura constituída por camadas finitas, assentadas sobre um terreno ou fundação o qual é designado subleito. Cada camada do pavimento possui funções específicas, normalmente divididas em sub-base, base e revestimento e a estabilização

ocorre nestas camadas, ou seja, abaixo da camada de rolamento (PEREIRA, 2012). Para classificação do pavimento, é necessário relacionar as tensões provenientes da camada de rolamento (camada externa), transmitidas para o subleito e também pelo comportamento e propriedades mecânicas da estrutura.

Os pavimentos normalmente são classificados em flexíveis e rígidos. Conforme Bernucci *et al.* (2008), o pavimento flexível é uma mistura constituída de agregados e ligantes asfálticos. Já no pavimento rígido o revestimento é a placa de concreto, com a presença ou não de barras de aço na sua estrutura. Ainda, segundo Bernucci *et al.* (2008), nesses pavimentos a espessura é fixada em função da resistência à flexão das placas de concreto e das resistências das camadas subjacentes.

As camadas dos pavimentos recebem nomenclaturas distintas e cada camada possui sua função no pavimento, tanto como em uma seção de pavimentos rígidos e flexíveis. Antes da construção da rodovia, estudos para determinação do comportamento referente às cargas de tráfego são realizados a partir do Índice de Suporte Califórnia, conhecido como ensaio de CBR (*Califórnia Bearing Ratio*, em inglês).

Caso o CBR do solo seja menor que 2%, o material é substituído por um de melhor qualidade. Caso o CBR fique entre 2% a 20% é necessário um reforço do subleito. Com CBR maior que 20% a fundação (subleito) pode ser usado como sub-base (PEREIRA, 2012).

Na pavimentação, muitas vezes o solo encontrado na região não apresenta as características adequadas e exigidas do projeto geotécnico e para isso, o engenheiro responsável necessita de soluções para melhorias deste solo. Nestes casos, a procura por outros materiais de diferentes locais que satisfazem as condições mínimas é um dos métodos encontrados. No entanto, custos adicionais com transporte, por exemplo, podem inviabilizar este tipo de projeto (KELM, 2014).

A melhoria das propriedades do material e a mudança adequada no resultado final, pode ser obtida por três processos eficazes, conhecidos como estabilização mecânica, estabilização física e estabilização química. A escolha pelo tipo de estabilização é influenciada pelo custo, finalidade de obra e pelas características e propriedades do solo a qual necessita ser corrigido (KELM, 2014).

A estabilização química mais utilizada é de solo-cimento. A norma NBR 12253:2012 define a mistura solo-cimento como um “produto endurecido resultante da cura de uma mistura

íntima compactada de solo, cimento e água, em proporções estabelecidas através de dosagem, e executada de acordo com a NBR 12254:2013.” Com a adição do aditivo cimento no solo, ocorrem reações químicas entre o aditivo, os minerais do solo e a água presente nos poros da massa do produto (PEREIRA, 2012).

Vários tipos de cimento são utilizados para a estabilização do solo. Contudo, quando se trata de argila muita plástica e orgânica, é necessário uma quantidade maior de cimento para se obter uma mudança esperada nas propriedades mecânicas (SANDRONI E COSOLI, 2010, *apud* PEREIRA, 2012). Para fins rodoviários, a faixa usual de uso do aglomerante hidráulico fica entre 5% e 9% de cimento em relação à massa total. Percentuais maiores elevam os custos, tornando inviável economicamente a estabilização (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho é a estabilização de um solo colúvio aluvionar de Depósito Holocênico com adição de cimento e cinza de lodo de esgoto para aplicação nas camadas do pavimento. Como objetivos secundários, estão compreendidos: definir a melhor temperatura de calcinação e a granulometria ideal de moagem do lodo para aplicação nas misturas; avaliar as condições de incorporação do lodo no solo juntamente com o cimento, e por fim, verificar a possibilidade de utilização em rodovias pavimentadas.

Materiais e Métodos

O material utilizado na pesquisa se refere do Solo Colúvio Aluvionar. O ponto de coleta está localizado na zona rural de Rio do Salto à 12 km do município de Timbé do Sul, Santa Catarina e possui as coordenadas Universal Transversor Mercator (UTM) (SIRGAS 2000 22J) E: 620098.68 m e S: 6810963.16 m, como mostra a Figura 01. A Tabela 01 apresenta os valores das propriedades físicas e mecânicas do solo *in natura*, denominado SH 100 (Solo Holocênico).



Figura 01. Ponto de coleta do Solo Colúvio Aluvionar (Fonte: Google Earth, 2019)

Tabela 01. Propriedades físicas e mecânicas do solo *in natura* (Fonte: LMS, 2018)

Características	SH100
LL (%)	46
LP (%)	41
IP (%)	5
%passante n°200	99,9
HRB	A-5
$\omega_{ót}$ (%)	20
$\gamma_{dmáx}$ (g cm ⁻³)	1,56
CBR (%)	7,10
Expansão (%)	3,05

O lodo adicionado às misturas foi coletado da Estação de Tratamento de Efluentes da cidade de Criciúma, Santa Catarina, localizada no bairro Santa Luzia. Em função da umidade inicial, o material foi para a secagem em estufa e com o material seco os processos seguintes foram realizados. Através dos ensaios de Análise Térmica Diferencial (DTA) e de Termogravimetria (TG), foi possível verificar a quantidade de perda de massa em determinada temperatura, ou seja, a temperatura ideal onde a variação de massa é pequena. Os resultados desses dados garantem o lodo passe pelo processo de calcinação sem perdas gradativas de sua massa.

Com base na análise térmica foi estabelecido que a melhor temperatura para calcinação do lodo ocorreu a 800 °C em uma taxa de aquecimento de 10°C min⁻¹. Deste modo, para se obter a cinza desse material, o lodo calcinado passou pela moagem por meio do moinho horizontal, conhecido como gira jarros. O produto final resultante da moagem possui

granulometria passante na peneira nº 50, com abertura de 0,297 mm. Com a cinza do lodo foi realizado o ensaio de difração de raios-x, conhecido como DRX, para determinação mineralógica do material.

O programa experimental contemplou as etapas apresentadas no fluxograma na Figura 02. Todos os ensaios seguiram as normas técnicas expostas na Tabela 02.

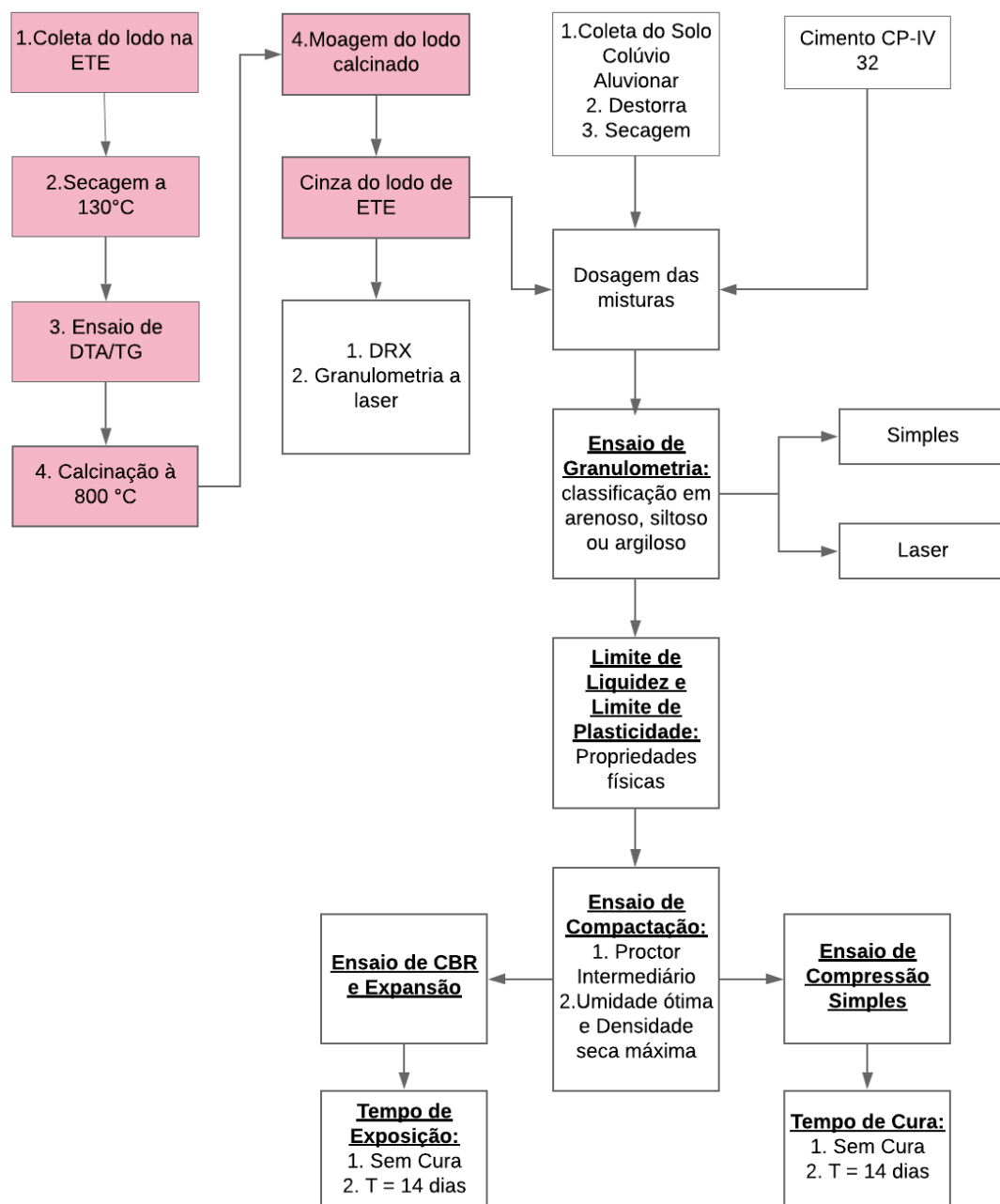


Figura 02. Fluxograma dos processos para obtenção dos resultados

Tabela 02. Lista de normas para os ensaios (Fonte: ABNT, 2019)

Norma/Resolução	Descrição
NBR nº 7180 de 2016	Solo – Determinação do Limite de Plasticidade
NBR nº 7181 de 2018	Solo – Análise Granulométrica
NBR nº 7182 de 2016	Solo – Ensaio de Compactação
NBR nº 6459 de 2017	Solo – Determinação do Limite de Liquidez
NBR nº 9895 de 2016	Solo – Índice de Suporte Califórnia – Método de Ensaio
NBR nº 12770 de 1992	Solo Coesivo – Determinação da Resistência à Compressão não confinada

Após o preparo dos materiais, foram definidas as misturas de acordo com a proporção de cada material em questão. Conforme o Tabela 03 abaixo, é possível identificar as dosagens de cada material e suas respectivas nomenclaturas.

Tabela 03. Lista das porcentagens das misturas

Tabela de Composição		
Mistura 01	100% Solo argiloso holocênico puro <i>in natura</i>	SH100
Mistura 02	95% Solo argiloso holocênico + 5% cimento	SH95/C5
Mistura 03	92% Solo argiloso holocênico + 8% cimento	SH92/C8
Mistura 04	90% Solo argiloso holocênico + 5% cimento + 5% lodo	SH90/C5/L5
Mistura 05	88% Solo argiloso holocênico + 5% cimento + 7% lodo	SH88/C5/L7
Mistura 06	87% Solo argiloso holocênico + 8% cimento + 5% lodo	SH87/C8/L5
Mistura 07	85% Solo argiloso holocênico + 8% cimento + 7% lodo	SH85/C8/L7

Com as dosagens definidas de cada material e suas respectivas porcentagens foi realizada inicialmente a caracterização das misturas, através do Ensaio de Granulometria por peneiramento simples e a laser, para obtenção da Curva Granulométrica e identificação das porções de tamanhos de grãos constituintes.

Para os ensaios dos Índices de Consistência foram realizados os Ensaio de Limite de Liquidez (LL) e Plasticidade. É com a umidade encontrada no ensaio do LP que se inicia o ensaio de compactação, fundamental para obter a umidade ótima. Segundo Pinto (2006), a umidade ótima do solo é muito próxima e um pouco abaixo do limite de plasticidade. De posse

dos índices de consistência, foi executado o Ensaio de Proctor Intermediário para obtenção da correlação de teor de umidade ótima e peso específico seco das misturas e, a partir destes dados, foram moldados corpos de prova para o Ensaio de CBR e para o Ensaio de Compressão Simples.

É desejado um valor elevado de CBR com uma baixa expansão para adequar o uso do material na pavimentação, onde a espessura do pavimento depende do tráfego (BRASIL. DNIT, 2006). Tanto para o ensaio de CBR quanto para o ensaio de compressão simples foi considerado tempo de cura. O tempo de exposição dos corpos de prova moldados foi estabelecido em dois períodos, rompidos sem tempo de exposição (tempo zero) e após 14 dias. Vale ressaltar que para o rompimento dos corpos de prova para o ensaio de CBR aos 14 dias, após as 96 horas, o mesmo será tirado da água e exposto ao ambiente por 14 dias para o rompimento, não sendo imerso em água novamente.

Resultados e Discussões

Após a coleta do material, foi possível avaliar a umidade inicial do lodo em 78,87%, com isso, a inevitabilidade da secagem do material em estufa para posteriormente dar início aos demais processos. No ensaio de DRX do lodo calcinado foi observado que a fase cristalina majoritária que compõe o material é de quartzo, confirmando assim sua estruturação e, consequentemente, indicando que este se encontra intacto.

As curvas de distribuição granulométrica para as misturas propostas estão apresentadas na Figura 03. A mistura 07 (SH85/C8/L7) apresentou a predominância de material fino na porcentagem de 95,53%, enquanto que a mistura 03 (SH92/C8) apresentou 98,99%, sendo possível verificar a redução de finos nas misturas conforme a incorporação da cinza.

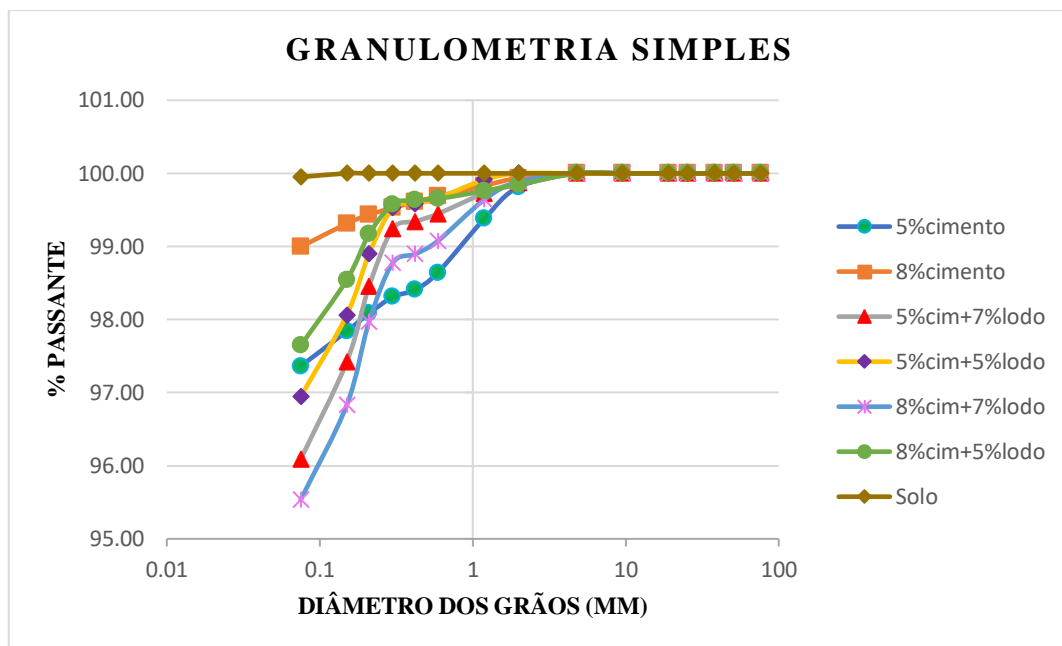


Figura 03. Granulometria

A análise de granulometria a laser, realizada com a fração passante em 0,075 mm para as misturas e com o passante em 0,09 mm para o lodo, indicou sem nenhuma exceção, que as misturas e o lodo foram considerados como silto argilosos, já que a matriz predominante foi composta por silte, variando entre 75,49% para o lodo e 79,84% para SH95/C5. Com a análise de granulometria a laser também foi possível identificar os tamanhos de grãos constituintes do lodo, com diâmetro médio de 22,63 μm .

Os resultados obtidos nos ensaios das propriedades físicas das misturas podem ser observados na Tabela 04. Ficou evidenciada que a redução de finos impactou diretamente nos limites de consistência (LL e LP) e, conseqüentemente nas classificações, já que misturas com maior quantidade de cinza tiveram classificações de materiais menos consistentes.



Tabela 04. Propriedades físicas das misturas

Misturas	% Passante nº 200	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Classificação HRB
Mistura 01 - SH100	99,9	46	41	5	A-5
Mistura 02 - SH95/C5	97,36	45	39	6	A-5
Mistura 03 - SH92/C8	98,99	43	35	8	A-5
Mistura 04 - SH90/C5/L5	96,94	45	37	8	A-5
Mistura 05 - SH88/C5/L7	96,09	47	38	9	A-5
Mistura 06 - SH87/C8/L5	97,64	NP	NP	0	A-4
Mistura 07 - SH85/C8/L7	95,53	NP	NP	0	A-4

Quanto aos valores de LL e LP, a mistura 02 (SH95/C5) apresentou 45% e 39%, respectivamente, o que equivale IP de 6%, inferior em 2% à mistura 03 (SH92/C8), que apresentou IP de 8%, decorrente do LL em 43% e LP em 35%. A mistura 05 (SH88/C5/L7) apresentou acréscimo de 1% no valor do IP em relação a mistura 04 (SH90/C5/L5), com IP em 9% e 8%, respectivamente. Vale salientar que nas misturas 06 (SH87/C8/L5) e 07 (SH85/C8/L7) os valores de LL e LP foram nulos, decorrentes da ausência de plasticidade em consequência da maior adição de cimento e lodo.

As misturas 02 (SH95/C5), 03 (SH92/C8), 04 (SH90/C5/L5) e 05 (SH88/C5/L7) foram classificadas em A-5 de acordo com a classificação HRB do solo, comportamento semelhante ao solo *in natura* que apresentou a mesma classificação. Pode ser verificado que houve alteração na classificação do solo nas misturas 06 (SH87/C8/L5) e 07 (SH85/C8/L7) em virtude da maior percentagem de lodo e cimento ao solo, como mostra a Tabela 04.

Os resultados referentes aos ensaios de compactação com energia Proctor Intermediário, CBR e expansão estão expostos na Tabela 05. Na Tabela, onde se lê CBR sem cura foi considerado o rompimento imediato da amostra após a retirada do tanque seguida de sua drenagem e CBR cura 14d, a amostra teve 14 dias de cura antes do rompimento. Dentre os resultados obtidos foi observado que a menor umidade ótima foi obtida na amostra 03 (SH92/C8), atingindo valor de 19,98%. Essa mesma amostra apresentou maior valor de CBR após 14 dias de cura, valor de 171,90%.

Ao observar o CBR de 7,10% e a expansão de 3,05% do solo *in natura* na Tabela 02, o mesmo possui potencial para uso como corpo de aterro em obras de terraplenagem, seguindo o que indica o DNIT 108 (2009, p. 3), “para efeito de execução do corpo de aterro, apresentar



capacidade de suporte adequada ($\text{CBR} \geq 2\%$) e expansão menor ou igual a 4%”. Em resultado disso, as misturas 02 (SH95/C5), 03 (SH92/C8), 04 (SH90/C5/L5), 05 (SH88/C5/L7) e 06 (SH87/C8/L5) podem ser utilizadas para corpo de aterro.

Também foi possível observar que as misturas 04 (SH90/C5/L5) e 06 (SH87/C8/L5) com teor em 5% de lodo apresentaram maiores valores de CBR, em 25,30% e 36,70% respectivamente, em relação as misturas 05 (SH88/C5/L7) e 07 (SH85/C8/L7), em 16,70% e 24,70% respectivamente. O CBR obtido na mistura 03 (SH92/C8) com 125,80% apresentou valor elevado quando comparado às demais misturas e ao solo *in natura* em virtude da maior proporção do cimento adicionado.

“Os materiais para subleito devem apresentar expansão menor ou igual a 2% e CBR maior ou igual a 2%, enquanto materiais para reforço de subleito devem apresentar CBR maior que o do subleito e expansão menor ou igual a 1%” (BRASIL. DNIT, 2006, P. 142). Deste modo, é possível verificar que os valores obtidos para as misturas 02 (SH95/C5), 03 (SH92/C8), 04 (SH90/C5/L5) e 05 (SH88/C5/L7) (Tabela 05) se enquadram com potencial para aplicação como camada de subleito. Vale salientar a possibilidade de aplicação das misturas 02 (SH95/C5) e 03 (SH92/C8) como reforço do subleito, em vista que as mesmas possuem expansão de 0,70% e 0,45% respectivamente, atendendo os parâmetros propostos acima.

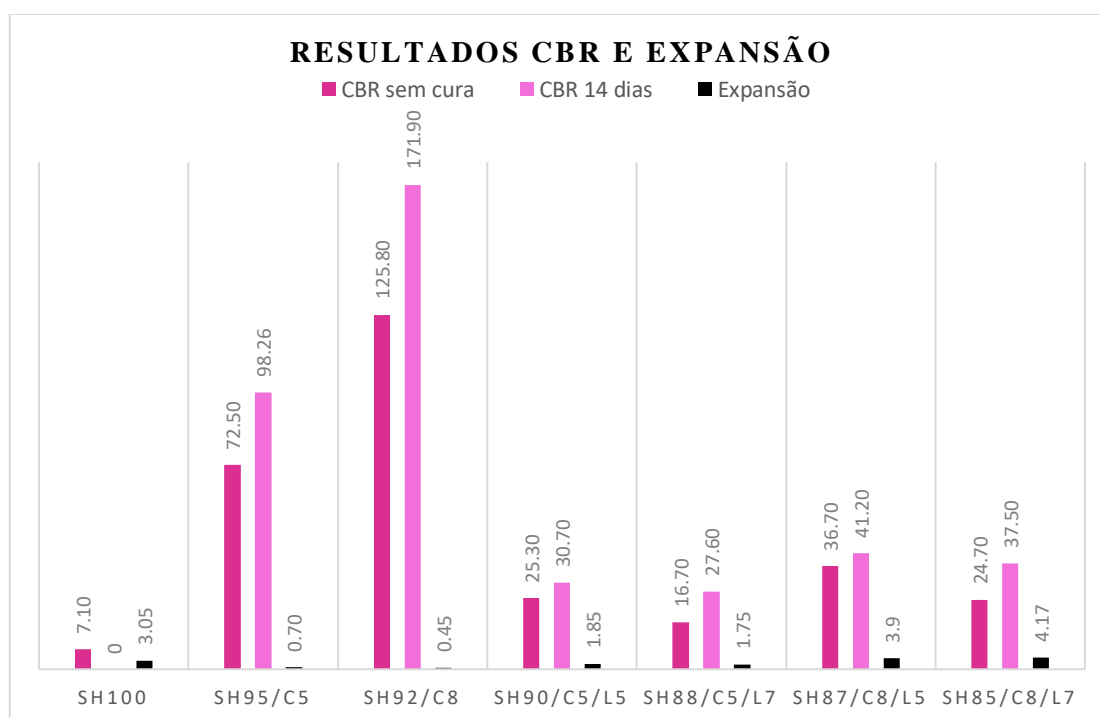
Tabela 05. Comparativo dos resultados de compactação, CBR e expansão

Misturas	ω ótima (%)	γ_d máx (g.cm^{-3})	CBR sem cura (%)	CBR 14 dias (%)	Expansão (%)
Mistura 01 - SH100	20,00	1,56	7,10	-	3,05
Mistura 02 - SH95/C5	20,50	1,55	72,50	98,26	0,70
Mistura 03 - SH92/C8	19,98	1,55	125,80	171,90	0,45
Mistura 04 - SH90/C5/L5	22,80	1,55	25,30	30,70	1,85
Mistura 05 - SH88/C5/L7	25,89	1,50	16,70	27,60	1,75
Mistura 06 - SH87/C8/L5	20,50	1,52	36,70	41,20	3,90
Mistura 07 - SH85/C8/L7	22,01	1,49	24,70	37,50	4,17

A figura 04 mostra os valores de CBR no tempo de cura zero, em 14 dias e a expansão. Através dos resultados apresentados é possível aplicar a mistura 03 (SH92/C8) como camada de base, sub-base, subleito e reforço do mesmo, a mistura 02 (SH95/C5) como sub-base, subleito e reforço, as misturas 04 (SH90/C5/L5) e 05 (SH88/C5/L7) como subleito e bem como a mistura 06 (SH87/C8/L5) e as demais descritas acima como corpo de aterro. A mistura 07

(SH85/C8/L7) apresentou valor de expansão maior que 4%, não atendendo aos parâmetros normativos, com isso, não sendo utilizável como camada estrutural do pavimento e como corpo de aterro em obras de terraplanagem.

Figura 04. Resultados CBR e Expansão



Para a resistência à compressão simples, os resultados obtidos se encontram na Tabela 06. Para o solo puro foi obtido 0,48 MPa sem cura, sendo possível observar o acréscimo de 0,10 MPa com o aumento do tempo de cura estimado em quatorze dias.

Para as misturas de solo e cimento foram obtidos os valores de 0,64 MPa para a mistura 02 (SH95/C5) e 0,60 MPa para a mistura 03 (SH92/C8), sem tempo de cura, sendo notório o aumento da resistência com a adição do estabilizante. Para as misturas com o lodo calcinado e cimento, os valores de resistência para a mistura 04 (SH90/C5/L5) e para a mistura 05 (SH88/C5/L7), ambas com 5% de cimento, foi 0,54 MPa e 0,39 MPa, respectivamente, sem tempo de cura. Ao atingir os 14 dias de cura, a resistência aumentou para 0,69 MPa e para 0,59 MPa, para a mistura 04 e para a mistura 05, respectivamente.

Tabela 06. Comparativo da Resistência à Compressão Simples

Misturas	σ (MPa) sem cura	σ (MPa) cura de 14 dias
Mistura 01 - SH100	0,48	0,58
Mistura 02 - SH95/C5	0,64	1,00
Mistura 03 - SH92/C8	0,60	1,85
Mistura 04 - SH90/C5/L5	0,54	0,69
Mistura 05 - SH88/C5/L7	0,39	0,59
Mistura 06 - SH87/C8/L5	0,92	1,30
Mistura 07 - SH85/C8/L7	0,90	1,13

Conclusões

Com base nos resultados apresentados foi possível constatar que o comportamento do solo argiloso *in natura* não apresenta boas propriedades físicas para a utilização como camadas do pavimento, sendo adequado somente para obras de terraplanagem. Esta condição ocorre devido à elevada presença de finos na composição do solo e à característica marcante de plasticidade, ou seja, capacidade em reter a água. Decorrente disso, a particularidade dos solos argilosos pode ocasionar mudanças nas suas características e forma, sem alteração do volume, podendo levar a diminuição gradativa da resistência sem apresentar evidências.

Este tipo de situação pode ser melhorada quando adicionado o cimento ao solo, devido a sua característica pozolânica, já que o mesmo possui eficácia para tornar o material utilizável na pavimentação. De acordo com os resultados obtidos houve o aumento do valor do CBR de maneira gradativa à medida que a porção de cimento cresce. Para a mistura com 5% de cimento e restante solo, o CBR encontrado foi de 72,50%. Com o acréscimo de 3% de cimento, o CBR foi para 125,80%, sem tempo de cura, acarretando na diminuição da expansão com o aumento de cimento, partindo de 0,70% com 5% de cimento para 0,45% com 8%, se adequando aos parâmetros exigidos para utilização como camada de base, que deve possuir CBR maior ou igual a 80% e expansão menor ou igual a 0,50%, de acordo com as normas técnicas e pelo DNIT.

Deste modo, foi constatado que ao utilizar 5% de cimento, quantidade mínima recomendada, o CBR, apesar de ter aumentado em relação ao solo puro, não alcançou o valor de 80%, considerado mínimo para uso como camada de base. Quanto à expansão, esta não

atendeu ao valor máximo de 0,50%. Já com a porcentagem de 8% de cimento, o CBR ultrapassou 100%, o máximo descrito para uso como base, atingindo o valor de 125,80% e a expansão diminuiu, chegando a 0,45%.

Foi observado que as misturas com maior adição de lodo apresentaram valores menores de CBR, com 16,70% para a mistura 05 (SH88/C5/L7) e 24,70% para a mistura 07 (SH85/C8/L7), sem tempo de cura. A mistura 07 (SH85/C8/L7) apresentou expansão maior que 4% e, com isso, não se tornou utilizável na pavimentação. Quanto aos valores de resistência à compressão, estes diminuíram com a maior quantidade de lodo adicionado. A mistura 05 (SH88/C5/L7) apresentou resistência de 0,39 MPa e a mistura 04 (SH90/C5/L5) obteve resistência de 0,54 MPa, acréscimo de 0,15 MPa com 2% a menos de lodo. Em vista disso, foi possível inferir que a incorporação do lodo calcinado ao solo argiloso em menor quantidade modificou as propriedades do material puro de forma satisfatória, aumentando a resistência com a menor porcentagem de lodo.

Com os resultados apresentados para a mistura 05 (SH88/C5/L7), umidade ótima de 25,89% e índice de plasticidade de 9%, foi possível concluir que, ao adicionar o lodo e o cimento, o solo se tornou mais argiloso em relação ao solo puro até o percentual em 5% cimento e 5% lodo. Com percentuais maiores, em 8% cimento e 7% lodo, o solo natural perdeu plasticidade, se tornando não plástico. Para a mistura 03 (SH92/C8) o valor encontrado de umidade ótima de 19,98% e índice de plasticidade de 8%. Neste caso houve o aumento de plasticidade enquanto o valor de umidade se manteve próximo em comparação ao solo *in natura*, sendo a mistura com menor percentual de argila.

De modo geral, com base nos resultados obtidos, foi possível aplicar a mistura 03 (SH92/C8) como camada de base, sub-base, subleito e reforço do mesmo, a mistura 02 (SH95/C5) como sub-base, subleito e reforço, as misturas 05 (SH88/C5/L7) e 04 (SH90/C5/L5) como subleito e bem como a mistura 06 (SH87/C8/L5) e as demais descritas acima como corpo de aterro. Os resultados acima descritos mostram que o objetivo principal do trabalho foi atendido, permitindo a análise das condições de incorporação do lodo no solo juntamente com o cimento com potencial aplicabilidade em camadas de pavimento. Vale ressaltar que para a utilização do lodo de esgoto é recomendada a caracterização do material frente a NBR n° 10.004/2004 e CONAMA n° 420/2009 e 460/2013, afim de evitar que o material venha a transmitir agentes infecciosos.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7181**: Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6459**: Determinação do Limite de Liquidez de Solos. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7180**: Determinação do Limite de Plasticidade de Solos. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7182**: Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9895**: Índice de Suporte Califórnia. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12253**: Solo cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004**: Resíduos Sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12770**: Solo Coesivo – Determinação da Resistência à Compressão não confinada. Rio de Janeiro, 1992.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica**: Formação básica para engenheiros. 3. ed. Rio de Janeiro: Petrobras: Abeda, 2008. 504 p.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 108: Terraplenagem - Aterros - Especificação de serviços**. Rio de Janeiro, 2009.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentação**. 3 ed. Rio de Janeiro, 2006. 274 p.

BRITO, L. C.; PARANHOS, H. da S. **Estabilização de Solos**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Edição 06. Ano 02, Vol. 01. pp 425-438, Setembro de 2017. ISSN:2448-0959

CANEPELE, J. W. **Estabilização de um solo residual com adição de cimento portland**. 2016. 72 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Centro Universitário Univates, Lajeado, 2016.

CORRÊA, Juliana F. **Avaliação das melhorias das propriedades físicas e mecânicas de solos originados de rochas sedimentares pela adição de cal para fins de pavimentação.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

GEYER, A. L. B. **Contribuição ao estudo da disposição final e aproveitamento da cinza de lodo de estação de tratamento de esgotos sanitários como adição em concretos.** 2001. 238 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

GHEDIN, S. C. D. **Estabilização mecânica de um solo da formação palermo com aditivos 298®.** 2014. 12 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2014.

KELM, T. A. **Avaliação do uso de lodo de estação de tratamento de esgoto na estabilização de materiais para pavimentação.** 2014. 230 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

LEI Nº 9.605, Lei de Crimes Ambientais, 1998. Acessado em: www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9605.htm, 21 de abril de 2019.

PEDROZA, M.M., VIEIRA, G.E.G., SOUZA, J.F., PICKLER, A.C., LEAL, E.R.M., MILHOMEN, C.C. Produção e tratamento de lodo de esgoto – uma revisão. **Revista Liberato (Online)**, Novo Hamburgo, v.11, n. 16, p. 89-188, jul/dez, 2010. Disponível em: <http://www.liberato.com.br/sites/default/files/arquivos/Revista_SIER/v.%2011%2C%20n.%2016%20%282010%29%2F5.%20Produ%27%E3o%20e%20Tratamento%20de%20Lodo%20de%20Esgoto.pdf>. Acesso em: 01/03/2019.

PEREIRA, K. L. A. **Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos.** 2012. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

PINTO, Carlos de Sousa. Compactação dos Solos: O Ensaio Normal de Compactação. In: PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas.** 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. Cap. 4. p. 78-79.